

RADIONUKLIDOK BELÉGZÉSE ÉS LENYELÉSE RÉVÉN SZÁRMAZÓ SZERVDOZISOK SZÁMITÁSI MODELLJE ÉS SZÁMITÓGÉPES PROGRAMJA

Szabó Zsuzsa, Kerekes Andor

Országos "Frédéric Joliot-Curie" Sugárbiológiai és Sugáregészségügyi Kutató Intézet

A Paksi Atomerőmű közelgő üzembeállítása felvetette azon környezetellenőrzési módszerek vizsgálatát, amelyek segítségével a légkörbe és a folyóvizbe kibocsátott radioaktív szennyezőanyagok környezetbeni vándorlása nyomonkövethető és végső soron a lakosság esetleges sugárterhelése becsülhető. Ezen vizsgálatok egyrészt fizikai mérésekből, másrészt matematikai-fizikai számítási módszerekből tevődnek össze. A matematikai eljárásokon alapuló módszerek három fő részre tagolhatók:

1. a kibocsátott radionuklidok légköri és vízi terjedési modellje;
2. az emberhez vezető környezeti utvonalak /pl. tápláléklánc/ vizsgálata;
3. az emberi szervezetbe bekerült radioaktív anyagok által okozott szerv- és szövetdózisok becslése.

A következőkben a 3. pontnak megfelelően, a belső sugárterhelés nagyságának meghatározására szolgáló matematikai modellt ismertetjük részletesebben.

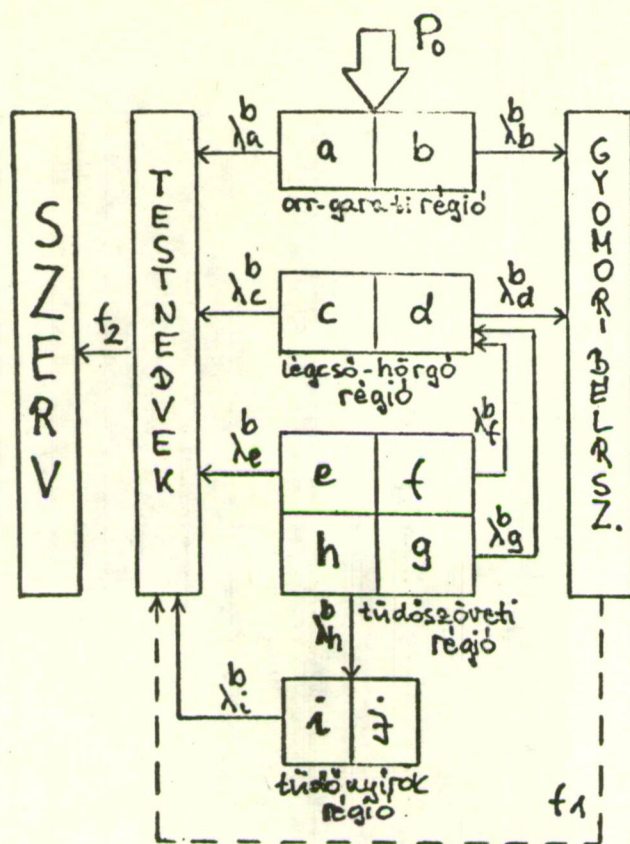
Radioaktív anyag két fő úton kerülhet az emberi szervezetbe:

- belégzéskor a légzőszerveken át,
- lenyeléskor a gyomor- és bélrendszeren keresztül.

A bekerült radioaktív anyagok szervezeten belüli viselkedését az ICRP [1] ajánlásoknak megfelelően, az általánosan elfogadott ún. kompartment modell segítségével írhatjuk le. A modell alapja, hogy a radionuklidok vándorlási utvonalaait olyan egymástól különálló, elválasztható részekre - kompartmentekre - bontjuk, melyeken keresztül különböző átmeneti tényezőkkel "vándorol" a radionuklid a kérdéses szervig, illetve szövetig. Az átmeneti tényezők természetesen függvényei az adott radionuklid fizikai, kémiai és biológiai tulajdonságainak.

A számítási eljárásokban alkalmazott kompartment modellek diagramjait az 1. és a 2. ábrán tüntettük fel. A légzőrendszeren belül az alábbi utvonalaikat különböztetjük meg:

1. : a —————> testnedvek —————> szerv
2. : b —————> gyomor —————> testnedvek —————> szerv
3. : c —————> testnedvek —————> szerv
4. : d —————> gyomor —————> testnedvek —————> szerv
5. : e —————> testnedvek —————> szerv
6. : f —————> gyomor —————> testnedvek —————> szerv
7. : g —————> gyomor —————> testnedvek —————> szerv
8. : h —————> i —————> testnedvek —————> szerv



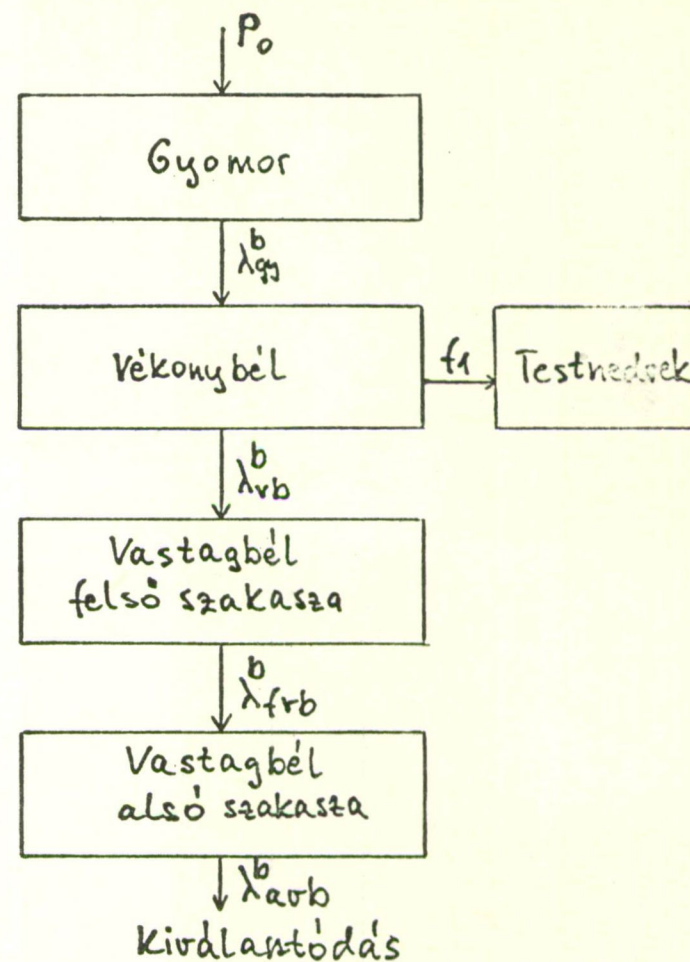
P_0 - felvételi sebesség,

f_1 - a gyomor-bélrendszerből a keringésbe jutó hányad

f_2 - a keringésből a szervbe jutó hányad

$\lambda_{a-i, j}$ - az adott kompartmentre vonatkozó biológiai bomlási állandó

1. ábra ICRP tüdő modell



P_0 - a radioaktív anyag lenyelési sebessége

2. ábra ICRP gyomor-bélrendszer modell

A belélegzett radionuklidoknak az egyes kompartmentekre vonatkozó eltávolodási hányada a nuklid oldékonyságától /jól-oldódó, oldékony, oldhatatlan/, a régiókban való lerakódási hányada pedig a részecske-átmérőtől függ. /Erre vonatkozó adatok az ICRP ajánlásokban találhatók./

A kompartmentek közötti vándorlás lineáris differenciálegyenletekkel, ún. transzport egyenletekkel jól jellemezhető, ezek általános alakja a következő:

légzőszerveknél:

$$\frac{d A_{jk}(t)}{dt} = C_{jk} P_o - \lambda_j A_{jk}(t) ,$$

ahol A_{jk} - a k régió j kompartmentjében lévő radioaktív anyagmennyiség;

C_{jk} - transzport együttható, $C_{jk} = f_j \cdot D_k$,

f_j - eltávolodási hányad,

D_k - a k régióba való kiülepedési hányad;

λ_j - effektív bomlási állandó, $\lambda_j = \lambda_j^b + \lambda^r$,

λ_j^b - biológiai eltávolodási hányad,

λ^r - fizikai bomlási állandó;

P_o - a radionuklid felvételi sebessége;

t - idő,

gyomorbanál:

$$\frac{d A_{gy}(t)}{dt} = P_o - \lambda_{gy} A_{gy}(t)$$

bélrendszerbenél:

$$\frac{d A_j(t)}{dt} = \lambda_{j-1} A_{j-1}(t) - \lambda_j A_j(t) .$$

A fenti egyenletek a $t = 0$, $A_j(0) = 0$ kezdeti feltétel /zérus időpillanatban a kompartmentekben lévő radioaktív anyagmennyiség nulla/ mellett explicite - exponenciális alakban - megoldhatók.

Egy tetszőleges j utvonal mentén egy adott szervbe bekerülő $A^j(t)$ radioaktív anyag mennyisége a

$$\frac{d A^j(t)}{dt} = \lambda_j^b \cdot f_2 \cdot A_j(t) - \lambda \cdot A^j(t)$$

/ λ - az adott szervre vonatkozó effektív bomlási állandó/

egyenlet, a bekerülő $A(t)$ összanyagmennyiség pedig az

$A(t) = \sum_j A^j(t)$ összefüggés alapján számítható. Az adott szerv, vagy szövet sugárterhelését a

$$D(t) = \frac{E C_0}{M} \int_0^t A(\tau) d\tau$$

formula szerint határozzuk meg, ahol

E - a szerv által lekötött effektív energia,

M - a szerv tömege,

C_0 - átváltási tényező,

D - az okozott dózis.

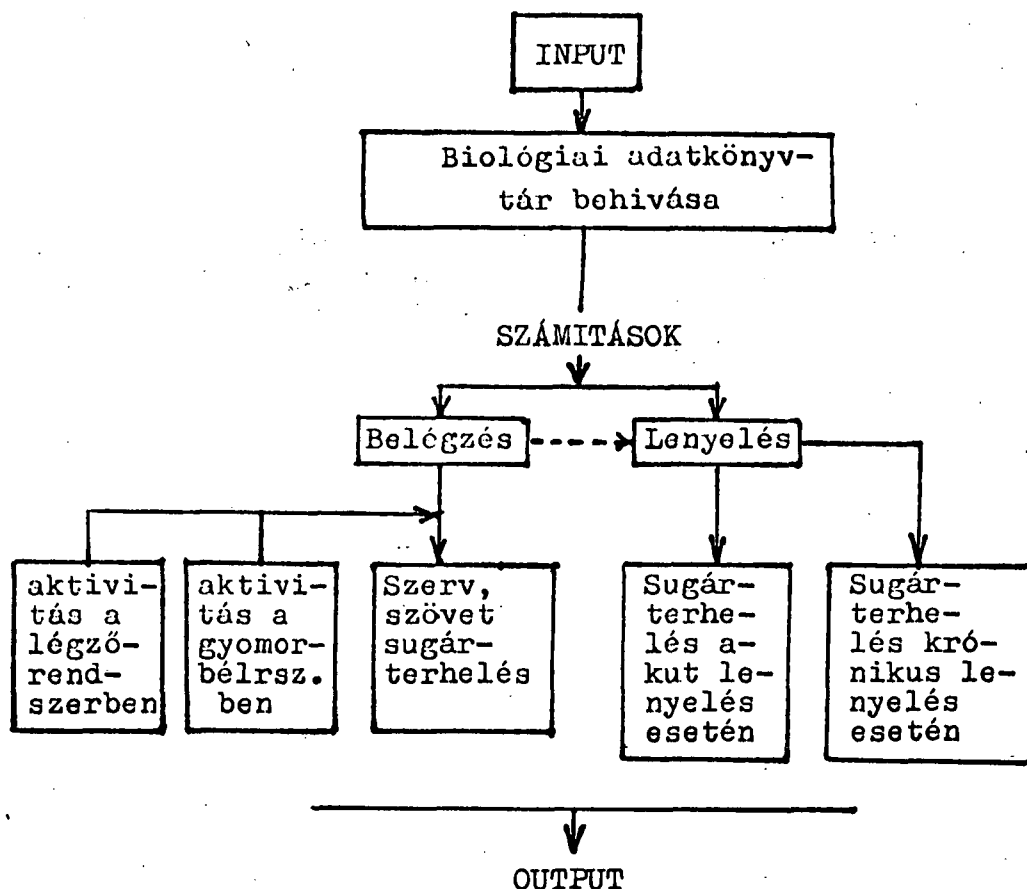
Az ismerttetett számítások elvégzéséhez az ACRO [2] FORTRAN nyelvű számítógépes programot adaptáltuk CDC-3300-as gépre. A program kiinduló lépésként beolvassa az input kártyákat /lsd. 3. és 4. ábra/, behívja a biológiai adatkönyvtár file-t /lsd. 5. ábra/, majd az input kártyákon megjelölt felvételi módok szerint rátér a szükséges számítási eljárások végrehajtására. A program output formátuma a 6. és a 7. ábrákon látható, amelyeket feltételezett értékekre /1 éves inhalációs periódus alatt felvett 1 mikroCi aktivitásból eredő aktivitáskoncentrációk és dózisterhelések 1, illetve 50 év eltelte után hat különböző radionuklidra/ elvégzett programfuttatás eredményeként kaptunk.

1. nuklid-név, rendszám, tömegszám
2. stabilitási osztály, szervkód /23 különböző szervre képes számolni a program/
3. szervenként: - fizikai, biológiai felezési idő,
- lenyelés és belégzés esetén a megfelelő szervre vonatkozó eltávolodási hányadok,
- a keringésből a szervbe jutó hányad
4. effektív abszorbeált energia az adott szervben, az oldékonyági osztályok szerint

5. ábra A biológiai adatkönyvtár tartalma

Irodalom:

- [1] ICRP, Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, Annals of the ICRP, vol. 1, No. 3, 1977
ICRP, Report of Committee II on Permissible Dose for Internal Radiation, ICRP Publication 2
ICRP, Limits for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 30
- [2] Kitahara et. al.: ACRO - A Computer Program for Calculating Radiation Organ Doses from Acute or Chronic Inhalation and Ingestion of Radionuclides, PNCT 843-80-11, 1980



3. ábra Az ACRO program rövidített blokkdiagramja

1. kártya: cím
2. kártya: dátum
3. kártya: szerv-kódok
4. kártya: nuklid jellemzők - rendszám, tömegszám, oldékonysági osztály, stabilitási osztály, felvételi periódus, számítási idő, felvett öss-aktivitás, kiülepedési hányadok, részecske átmérő
5. kártya: a felvétel módja - belégzés
- akut lenyelés
- krónikus lenyelés

4. ábra Az input kártyák tartalma

ACRO -- A COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATING ORGAN DOSE FROM ACUTE OR CHRONIC
INHALATION AND INGESTION OF RADIONUCLIDE

DATE PAGE
8

.....TIME INTERVAL FOLLOWING THE START OF INTAKE = 3.1536E+07 (SEC).OR 365. (DAYS)

ORGAN BURDEN (MICRO CI OR * 3.7E+4 BQ.)
=====

--- ORGAN ---									
NUCLIDE	TR.CLASS	T.BODY	KIDNEYS	LIVER	BONE	LUNGS	TESTES	MUSCLE	THYROID
I129	D	2.9188E-11	7.0516E-04	2.1155E-13	2.4681E-03	5.9961E-04	6.8145E-05	0.0000E-1	6.7564E-02
I131	D	1.8616E-12	3.6655E-04	1.996E-13	8.7564E-04	5.5938E-04	0.0000E-01	0.0000E-1	5.5848E-03
CS134	D	1.5943E-11	1.0053E-03	1.3687E-12	1.0614E-02	5.9920E-04	0.0000E-01	1.0614E-1	0.0000E-01
CS137	D	1.7054E-11	1.0512E-03	1.481E-12	1.1688E-02	5.9958E-04	0.0000E-01	1.1688E-1	0.0000E-01
AM241	W	1.0785E-11	3.2356E-03	3.7666E-13	2.7036E-02	3.2281E-02	3.7973E-05	0.0000E-1	0.0000E-01
RU106	Y	5.7611E-14	4.7058E-05	1.0000E-11	1.1520E-04	9.2762E-02	0.0000E-01	0.0000E-1	0.0000E-01

ACRO -- A COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATING ORGAN DOSE FROM ACUTE OR CHRONIC
INHALATION AND INGESTION OF RADIONUCLIDE

DATE PAGE
9

PROBA
INHALATION

.....TIME INTERVAL FOLLOWING THE START OF INTAKE = 3.1536E+07 (SEC).OR 365. (DAYS)

ORGAN DOSE EQUIVALENT (REM OR 1.E-2 SV)
=====

--- ORGAN ---									
NUCLIDE	TR.CLASS	T.BODY	KIDNEYS	LIVER	BONE	LUNGS	TESTES	MUSCLE	THYROID
I129	D	4.4627E-12	8.6631E-12	9.9044E-12	8.3490E-13	9.1586E-04	6.8509E-12	0.0000E-1	3.5602E+00
I131	D	2.1171E-13	5.8670E-03	3.3681E-13	3.2017E-03	3.1263E-03	0.0000E-01	0.0000E-1	1.1620E+00
CS134	D	3.5737E-12	2.3470E-02	5.8619E-12	2.6020E-02	6.3619E-03	0.0000E-01	5.1627E-2	0.0000E-01
CS137	D	2.0160E-12	1.9583E-02	4.4637E-12	3.9341E-02	4.5790E-03	0.0000E-01	2.9606E-2	0.0000E-01
AM241	W	7.7067E-11	5.2207E+01	1.0474E+01	1.3274E+01	2.7438E+01	5.4165E-01	0.0000E-1	0.0000E-01
RU106	Y	2.1978E-14	3.2653E-03	1.0000E-11	2.3578E-03	1.4282E+00	0.0000E-01	0.0000E-1	0.0000E-01

ACRO -- A COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATING ORGAN DOSE FROM ACUTE OR CHRONIC
INHALATION AND INGESTION OF RADIONUCLIDE

DATE PAGE
1.

PROBA
INHALATION

.....TIME INTERVAL FOLLOWING THE START OF INTAKE = 1.5768E+09 (SEC).OR 18250. (DAYS)

ORGAN BURDEN (MICRO CI OR * 3.7E+4 BQ.)

=====

--- ORGAN ---									
NUCLIDE	TR. CLASS	T. BODY	KIDNEYS	LIVER	BONE	LUNGS	TESTES	MUSCLE	THYROID
I129	D	2.8327E-40	1.0000E-01	1.0000E-11	1.0000E-01	1.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-1	8.4980E-41
I131	D	0.0000E-01	1.0000E-01	1.0000E-11	0.0000E-01	1.0000E-01	0.0000E-01	0.0000E-1	0.0000E-31
CS134	D	7.6146E-86	2.5522E-13	5.705E-69	1.4484E-47	1.0000E-01	0.0000E-01	1.4484E-46	0.0000E-01
CS137	D	6.7732E-78	2.2191E-13	7.2612E-63	1.3263E-41	1.0000E-01	0.0000E-01	1.3263E-40	0.0000E-31
AM241	M	6.0073E-02	1.8022E-03	1.6687E-13	1.9920E-02	1.2493E-10	3.9276E-05	0.0000E-1	0.0000E-31
RU106	Y	1.7777E-09	1.2277E-11	1.0000E-11	3.0711E-10	4.8100E-18	0.0000E-01	0.0000E-1	0.0000E-01

ACRO -- A COMPUTER PROGRAM FOR CALCULATING ORGAN DOSE FROM ACUTE OR CHRONIC
INHALATION AND INGESTION OF RADIONUCLIDE

DATE PAGE
11

PROBA
INHALATION

.....TIME INTERVAL FOLLOWING THE START OF INTAKE = 1.5768E+09 (SEC).OR 18250. (DAYS)

ORGAN DOSE EQUIVALENT (REM OR 1.E-2 SV)

=====

--- ORGAN ---									
NUCLIDE	TR. CLASS	T. BODY	KIDNEYS	LIVER	BONE	LUNGS	TESTES	MUSCLE	THYROID
I129	D	9.2497E-03	8.9184E-12	1.0093E-11	8.8470E-13	9.1798E-04	7.0528E-12	0.0000E-11	6.6183E+00
I131	D	2.1848E-03	5.9607E-03	3.4219E-13	3.2698E-03	3.1330E-03	0.0000E-01	0.0000E-01	1.1991E+00
CS134	D	3.7728E-02	2.7970E-02	9.4700E-12	4.4674E-02	6.3765E-03	0.0000E-01	8.8638E-2	0.0000E-01
CS137	D	2.7565E-02	2.3480E-02	6.6923E-12	7.2797E-02	4.5895E-03	0.0000E-01	5.4783E-12	0.0000E-01
AM241	M	6.5274E+01	4.4218E+02	9.0365E+01	1.2757E+03	3.4653E+01	6.1212E+01	0.0000E-1	0.0000E-01
RU106	Y	5.1799E-04	8.9912E-03	1.0000E-11	6.8826E-03	3.7381E+00	0.0000E-01	0.0000E-11	0.0000E-01